بررسی خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای بتن‌های کامپوزیتی توانمند خودتراکم*

امیرحسین صحرایی‌مقدّم(۱) فریدون امیدی‌نسب(۲) احمد دالوند(۳)

چکیده *کامپوزیت‌های بتنی توانمند خودتراکم الیافی (HPFRSCC) مصالح توانمند و شکل‌پذیری هستند که از ترکیب ملاط سیمان و الیاف تشکیل می‌شوند. در این تحقیق خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای این کامپوزیت‌های بتنی به‌صورت تجربی بررسی‌شده است. بر روی نمونه‌ها آزمایش‌های متنوعی مانند آزمایش‌های مربوط به بتن خودتراکم تازه، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی، آزمایش اولتراسونیک و آزمایش مقاومت ضربه‌ای انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد الیاف فولادی می‌تواند بر روی خاصیت خودتراکمی و پیوستگی بتن تأثیر منفی و در بهبود خصوصیات مکانیکی و مقاومت ضربه‌ای بتن تأثیر مثبت داشته باشد که تأثیر آن در بهبود مقاومت ضربه‌ای بسیار قابل‌توجه‌تر است. در این تحقیق همچنین اثر دو پارامتر افزایش ضخامت دال و افزودن الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه‌ای دال‌ها بررسی و باهم مقایسه شد، نتیجه این بررسی نشان داد که الیاف فولادی پارامتر بسیار مهم‌تری در افزایش مقاومت ضربه‌ای دال‌ها است.*

واژه‌های کلیدی بتن کامپوزیتی، بتن توانمند، بتن خودتراکم، الیاف فولادی، ضربه وزنه افتان.

Investigation of Mechanical and Impact Properties of High Performance Self-Compacting Composite Concrete

Amir Hossein Sahraei Moghadam Fereydoon Omidinasab Ahmad Dalvand

Abstract *High performance self-compacting fiber reinforced composite concrete (HPFRSCC) are mighty and mighty materials that form a mixture of cement mortar and fiber. In this study, the mechanical and impact properties of these composite concrete have been empirically investigated. Various experiments were carried out on the samples, such as self-compacting concrete tests, compressive, splitting tensile and flexural strength tests, ultrasonic test and impact resistance test. The results of these experiments showed that steel fibers can have a negative effect on the self-compacting and cohesion properties of concrete, and have a positive effect on improving mechanical properties and impact strength of concrete, which has a significantly higher effect on impact resistance. In this study, the effect of two parameters of increasing the thickness of the slab and adding steel fibers to increase the impact strength of the slabs were surveyed and compared. The result of this study showed that steel fiber is a much more important parameter in increasing the impact strength of slabs.*

Key Words Composite concrete, High performance concrete, Self-compacting concrete, Steel fiber, Drop weight impact.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱۲/۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۵/۱۵ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه لرستان
(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه لرستان
(۳) استادیار دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه لرستان

Email: omidinasab.f@lu.ac.ir

مقدمه

بتن پرکاربردترین مصالح مهندسی عمران است، که به دلیل مزایای فنی و اقتصادی متعدد شاهد گسترش کاربرد آن در انواع سازه‌ها هستیم. از نقاط ضعف بتن و کلاً ماتریس‌های سیمانی، شکنندگی و عملکرد ترد آن‌ها خصوصاً تحت بارهای کششی و ضربه‌ای است. استفاده از الیاف طبیعی و مصنوعی جهت بهبود خواص مکانیکی بخصوص در ارتقا قابلیت جذب انرژی و افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن مدت‌ها است که موردتوجه محققان قرار گرفته است [1]. در سال‌های اخیر بتن با مقاومت بالا به‌طور گسترده‌ای در جهان مورداستفاده قرار می‌گیرد که به آن عبارت " بتن توانمند "اطلاق می‌گردد. بتن با مقاومت بالا (توانمند) به بتن‌هایی گفته می‌شود که دارای مقاومت فشاری بالاتر از ٤٢ مگاپاسکال باشند [2,3]. به‌کارگیری بتن‌های مرسوم نیازمند ویبره، در ساخت سازه‌های بتنی پرمیلگرد و با شکل‌های پیچیده همواره مسئله‌ساز بوده است [4]. امروزه تکنولوژی و فناوری نوین، ساخت بتن‌های خودتراکم با قابلیت جریان پذیری بالا را برای حل این مشکل پیشنهاد می‌کند [5]. بتن خودتراکم برای اولین بار برای دستیابی به ساختار بتن پایدار در سال ۱۹۸۸ مطرح گردید و مطالعات اولیه پیرامون بتن خودتراکم توسط Ozawa در سال ۱۹۸۹ و Okamura در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه توکیو انجام گرفت [6,7]. بتن خودتراکم دارای قابلیت جریان پذیری بالا و بدون جداشدگی است که می‌تواند به‌سرعت در محل، بدون تراکم اضافی جریان پذیرد و متراکم شود [8]. نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد بتن غیرمسلح در مقابل بارهای خمشی و ضربه‌ای دارای نواقصی است [9]. استفاده از الیاف‌های طبیعی و مصنوعی برای افزایش مقاومت بتن در مقابل بارهای خمشی و ضربه‌ای مؤثر است [10] از متداول‌ترین الیاف مورداستفاده جهت افزایش مقاومت بتن، الیاف فولادی می‌باشند [11]. تحقیقات انجام‌شده توسط Rao و همکاران [12] بر روی دال‌های بتنی دوطرفه مسلح شده با الیاف فولادی بر این نکته تأکید دارند که افزایش حجمی الیاف از ۰/۸ به ۱/۲ درصد سبب افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در جذب انرژی می‌گردد. Banthia و همکاران [13] مقاومت ضربه‌ای بتن حاوی نسل جدید الیاف‌های پلیمری و الیاف فولادی را باهم مقایسه کردند. در این تحقیق جذب انرژی تیرهای بتنی توسط دستگاه آزمایش وزنه افتان اندازه‌گیری شد و مشاهده شد تیرهای دارای الیاف فولادی دارای جذب انرژی به‌مراتب بالاتری می‌باشند. Soruoshian و همکاران [14] در تحقیقات خود نشان می‌دهند که اثر افزودن الیاف در افزایش مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و نهایی بسیار بیشتر از اثر آن بر روی مقاومت خمشی و طاقت بتن است. در این تحقیق از ترکیب بتن‌های توانمند خودتراکم با الیاف فولادی جهت ساخت نمونه‌ها استفاده‌شده و آزمایش‌های متنوعی مانند آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی، آزمایش اولتراسونیک و آزمایش مقاومت ضربه‌ای به‌صورت ضربه وزنه افتان بر روی نمونه‌ها انجام می‌شود. هدف اصلی در این تحقیق بررسی مقاومت ضربه‌ای دال‌ها بتنی کامپوزیتی توانمند و مقایسه تأثیر دو پارامتر افزایش ضخامت و افزودن الیاف فولادی در افزایش مقاومت ضربه‌ای دال‌ها است.

ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق تعداد ۲۷ عدد دال بتنی با ابعاد ٤٠×٤٠ با ضخامت‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر ساخته شد. از هرکدام از ضخامت‌های گفته‌شده تعداد ۹ عدد دال که ۳ عدد بدون الیاف، ۳ عدد دارای ۰/۵ درصد الیاف فولادی و ۳ عدد دارای ۱ درصد الیاف فولادی است، ساخته شد. مشخصات این دال‌ها و طرح اختلاط بکار برده شده برای ساخت آن‌ها در جدول (۱) آمده است. بر روی دال‌های ساخته‌شده آزمایش مقاومت ضربه‌ای به‌صورت ضربه وزنه انجام گرفت. همچنین در این تحقیق تعداد ۱۵ عدد نمونه فشاری مکعبی با ضلع ۱۰ سانتی‌متر، ۱۵ عدد نمونه کششی استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر و ۱۵ عدد

تیر کوچک خمشی با ابعاد ٦×۸×۳۲ سانتی‌متر با درصدهای متفاوت الیاف فولادی نشان داده شده در جدول (۲) ساخته شد. در ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند (تیپ ۲ بر اساس استاندارد (ASTM C150) [15] استفاده شده است. الیاف فولادی مورداستفاده از نوع دوسر قلاب و با طول ۵ سانتی‌متری و قطر ۰/۸ میلی‌متر است، مشخصات این الیاف در جدول (۳) نشان داده شده است. مصالح سنگی استفاده‌شده در این تحقیق همگی عبوری از الک نمره ۸ می‌باشند. برای ایجاد خاصیت خودتراکمی در بتن از محلول فوق روان کننده کربوکسیلاتی با نام تجاری Dezobuild 10 استفاده شد. تصویر مصالح مورداستفاده در این تحقیق در شکل (۱) آمده است. مراحل ساخت بتن به‌گونه‌ای بود که ابتدا ماسه و سیمان به‌صورت خشک به مدت ۲ دقیقه در میکسر مخلوط شده و سپس ۹۰ درصد آب موردنیاز به‌صورت تدریجی به مخلوط اضافه شد، فوق روان کننده با آب باقی‌مانده ترکیب و به بتن اضافه گردید. برای جلوگیری از مشکل گلوله شدن، الیاف‌ها در مرحلهٔ آخر و به‌صورت تدریجی به بتن اضافه شدند. بتن ساخته‌شده در قالب‌های چوبی مناسبی ریخته شده و برای جلوگیری از جذب آب بتن توسط چوب، سطح تماس بین بتن و قالب چوبی با پوشش پلاستیکی از هم جدا شد. تصاویری از نحوه ساخت نمونه‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. نمونه ها بعد از ٢٤ ساعت از قالب جدا و در شرایط مناسبی به‌صورت مرطوب عمل‌آوری و بعد از گذشت زمان ۲۸ روز آزمایش‌های لازم بر روی آن‌ها انجام شد.

جدول ۱ جزئیات ابعاد و طرح اختلاط بکار رفته در ساخت دال‌ها

Specimen	Dimensions	Mix-design					Number
		Aggregate (kg/m³)	Cement (kg/m³)	Water (kg/m³)	SP (kg/m³)	Volume (%) fiber	
T2.5-S0	40×40×2.5	1006	1006	383	4.8	0	3
T2.5-S0.5	40×40×2.5	1006	1006	383	4.8	0.5	3
T2.5-S1	40×40×2.5	1006	1006	383	4.8	1	3
T5-S0	40×40×5	1006	1006	383	4.8	0	3
T5-S0.5	40×40×5	1006	1006	383	4.8	0.5	3
T5-S1	40×40×5	1006	1006	383	4.8	1	3
T7.5-S0	40×40×7.5	1006	1006	383	4.8	0	3
T7.5-S0.5	40×40×7.5	1006	1006	383	4.8	0.5	3
T7.5-S1	40×40×7.5	1006	1006	383	4.8	1	3

جدول ۲ جزئیات ابعاد و میزان الیاف بکار رفته در ساخت نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی

Specimen	Volume fiber (%)	Dimensions of compressive specimens (cm)	Dimensions of tensile specimens (cm)	Dimensions of flexural specimens (cm)	Number
S0	0	10×10×10	10×20	32×8×6	3
S0.25	0.25	10×10×10	10×20	32×8×6	3
S0.5	0.5	10×10×10	10×20	32×8×6	3
S0.75	0.75	10×10×10	10×20	32×8×6	3
S1	1	10×10×10	10×20	32×8×6	3

جدول ۳ خصوصیات الیاف فولادی مورداستفاده

Fiber	Length (cm)	Diameter (cm)	L/D	Density (kg/m^3)	(GPa) E	Tensile strength (MPa)
Steel	5	0.08	62.5	7850	200	1100



شکل ۱ مصالح مورداستفاده در ساخت نمونه‌ها



شکل ۲ مراحل ساخت نمونه‌ها

انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه

برای تعیین خودتراکم بودن بتن موردا ستفاده و همچنین تأثیر الیاف فولادی بر روی خاصـیت خودتراکمی بتن، آزمایش‌هایی بر روی بتن تازه انجام شـد. در این مرحله از برنامه آزمایشـگاهی بر روی پنج طرح اختلاط نشـان داد شده در جدول (۲) آزمایش‌های رینگ G، قیف V، جعبه L و جعبه U انجام گرفت. Nagataki و همکارانش [16] نشان دادند میزان پهن شدگی و زمان جریان یافتن بتن در آز مایش G-ring دو پارامتر مهم در بررسـی کارایی بتن‌های خودتراکم می‌باشند. در این آزمایش قطر پهن‌شـدگی بتن و زمان پهن‌شـدگی بتن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شـد. Mastali و همکاران [3] بیان کردند که چنانچه قطر پهن‌شـدگی برای بتنی بیشـتر از

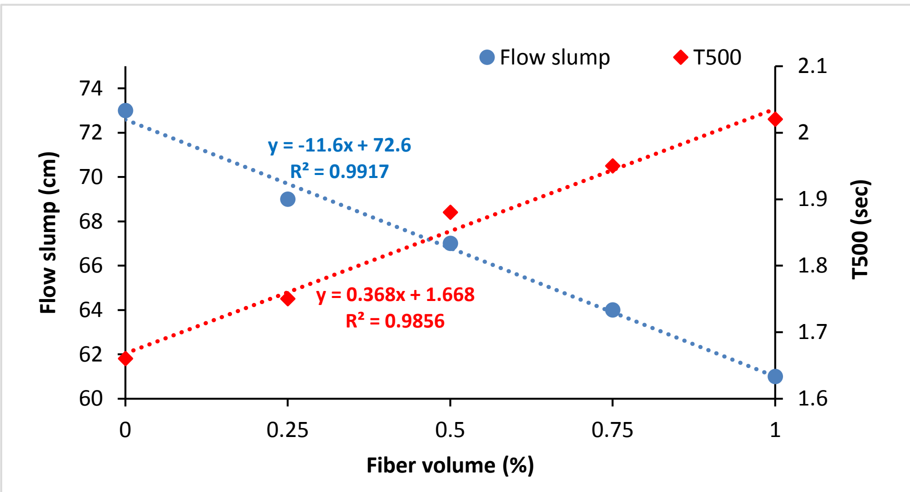
٦٠٠ میلی‌متر حاصل شود، می‌توان آن را یک بتن خودتراکم به‌حساب آورد. نتایج آزمایش‌های بتن تازه در جدول (٤) نشان داده شده است. اسلامپ روانی برای طرح اختلاط مورداستفاده بدون افزودن الیاف ٧٣ سانتی‌متر به دست آمد که نشان از خاصیت خودتراکمی بالای بتن مورداستفاده دارد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزودن الیاف فولادی می‌تواند تأثیر منفی بر روی خاصیت خودتراکمی بتن داشته باشد. در نمودار شکل (٤) با ارائه یک تحلیل رگرسیون ارتباط بین میزان الیاف فولادی با قطر پهن‌شدگی و زمان موردنیاز برای پخش بتن به صورت خطی به دست آمد، به‌طوری‌که با افزایش میزان الیاف پخش‌شدگی بتن کاهش و زمان موردنیاز برای پخش‌شدگی افزایش می‌یابد. در شکل (۳) نحوه انجام آزمایش قیف V مشاهده می‌شود.



شکل ۳ آزمایش قیف V

جدول ٤ نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه

Mix design	Flow slump		U-box (H_1-H_2) (cm)	L-box (H_2/H_1)	V-funnel (Sec)
	D (sec)	T_{500} (Sec)			
S0	73	1.66	12	0.94	3.21
S0.25	69	1.75	14	0.88	4.22
S0.5	67	1.88	15	0.84	4.89
S0.75	64	1.95	17	0.81	5.32
S1	61	2.02	18	0.79	5.97



شکل ٤ ارتباط بین درصد الیاف با خواص خودتراکمی بتن در آزمایش G-ring

آزمایش مقاومت فشاری

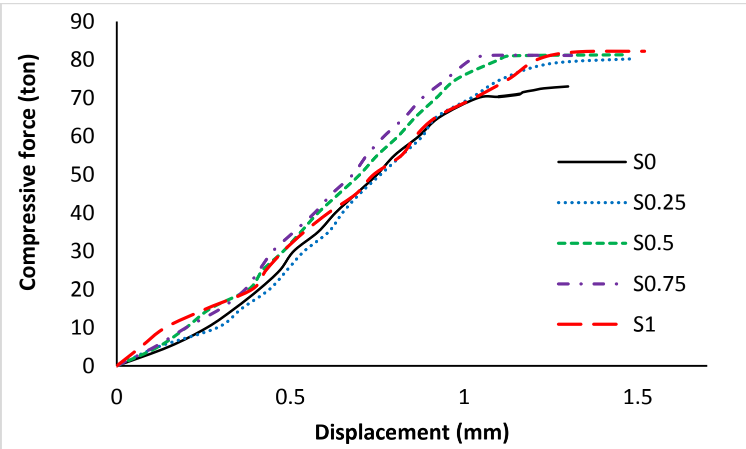
برای تعیین مقاومت فشـــاری بر روی ۱۵ عدد نمونه مکعبی با ضلع ۱۰ سانتی‌متر آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 [17] با استفاده از جک ۲۰۰ تنی انجام شـــد. در این آزمایش نیروی فشـــاری تحمل شـده توسـط نمونه‌ها برداشـت و از طریق رابطهٔ (۱) مقاومت فشاری نمونه برحسب مگاپاسکال محاسبه شد. در این رابطه P حداکثر نیروی فشاری تحمل شده توسـط نمونه و A مسـاحت سـطح مقطع نمونه مکعبی است:

$$\text{مقاومت فشاری} = \frac{P}{A} \qquad (۱)$$

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول (۵) آمده است. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شاهد (بدون الیاف) برابر ۷٤/۵ مگاپاسکال به دست آمد که نشان‌دهنده توانمند بودن طرح اختلاط مورداستفاده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های دارای درصدهای مختلف الیاف فولادی نشان می‌دهد که این الیاف نمی‌تواند تأثیر قابل‌توجهی را بر روی افزایش مقاومت فشاری بتن‌های توانمند داشته باشد. با اندازه‌گیری تغییر مکان نمونه‌ها تا لحظه گسیختگی نیز مشاهده شد الیاف فولادی بر روی تغییر مکان فشاری نمونه‌ها نیز نمی‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد. نمودار بار فشاری–تغییر مکان نمونه‌ها برای ۵ طرح اختلاط مورداستفاده در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Specimen	Volume of fiber (%)	SP1		SP2		SP3		Ave	
		C.S (Compressive strength) (MPa)	C.D (Compressive displacement) (mm)	C.S (MPa)	C.D (mm)	C.S (MPa)	C.D (mm)	C.S (MPa)	C.D (mm)
S0	0	77.3	1.3	68.7	1.51	77.6	1.44	74.5	1.42
S0.25	0.25	78.3	1.46	80.2	1.48	77.9	1.57	78.8	1.5
S0.5	0.5	81.3	1.47	80.9	1.60	78.6	1.49	80.3	1.52
S0.75	0.75	79.5	1.49	82.7	1.54	81.1	1.31	81.1	1.45
S1	1	82.2	1.52	84.5	1.48	79.8	1.47	82.2	1.49



شکل ۵ نمودار بار فشاری–تغییر مکان نمونه‌ها

آزمایش مقاومت کششی

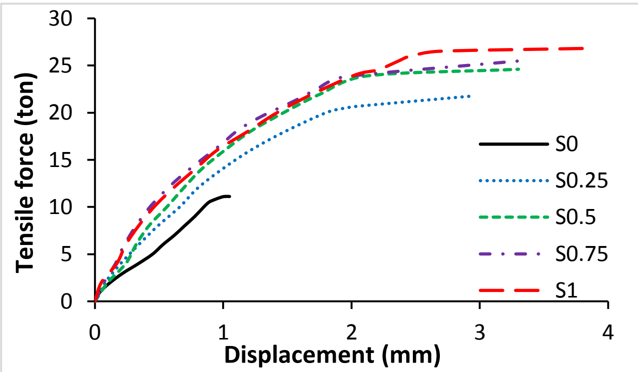
برای تعیین مقاومت کششی تعداد ۱۵ عدد نمونه استوانه-ای با ابعاد ۳۰×۱۵ سانتی‌متر ساخته و آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلی (دونیم شدن) بر اساس استاندارد ASTM C496 [18] بر روی آن‌ها انجام گرفت. با انجام این آزمایش حداکثر نیروی کششی تحمل شده توسط نمونه‌ها برداشت و از طریق رابطهٔ (۲) مقاومت کششی نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال محاسبه شد. در این رابطه P حداکثر نیروی کششی تحمل شده توسط نمونه و L و d به ترتیب طول و قطر نمونه استوانه‌ای است:

$$\text{مقاومت کششی} = \frac{2P}{\pi.L.d} \quad (۲)$$

نتایج آزمایش مقاومت کششی در جدول (٦) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد الیاف فولادی می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر روی مقاومت کششی بتن دا شت با شند. به‌طوری‌که افزودن ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ در صد الیاف فولادی توانست به ترتیب موجب افزایش ۷٤، ۱۰۹، ۱۱۳ و ۱۲۳ در صدی مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد شود. مشاهدات نشان داد که الیاف فولادی می‌تواند با ایجاد دوختگی در ترک کششی به وجود آمده در وسط نمونه ها باعث افزایش بیشتر مقاومت کششی شود. با محاسبه تغییر مکان ایجاد شده تا لحظه شکست در نمونه‌ها نیز مشاهده شد که الیاف فولادی می‌تواند تغییر مکان حداکثر تا ایجاد گسیختگی کششی در نمونه‌ها را نیز افزایش دهد. خصوصیات فیزیکی الیاف‌های فولادی موردا ستفاده که در دو انتهای خود دارای قلاب می‌باشند نیز باعث بهبود این شرایط شد، زیرا قلاب انتهای این الیاف ها با ایجاد درگیری بیشتر با بتن، موجب دوختگی بیشتر ترک‌ها شده و شکل‌پذیری نمونه را به مقدار قابل‌توجهی افزایش دادند. افزودن ۱ درصد الیاف فولادی توانست تغییر مکان حداکثر تا ایجاد گسیختگی در نمونه را تا حدود ٤ برابر افزایش دهد.

جدول ٦ نتایج آزمایش مقاومت کششی

Specimen	Volume of fiber (%)	SP1		SP2		SP3		Ave	
		T.S (Tensile strength) (MPa)	T.D (Tensile displacement) (mm)	T.S (MPa)	T.D (mm)	T.S (MPa)	T.D (mm)	T.S (MPa)	T.D (mm)
S0	0	3.54	1.05	3.69	1.16	3.79	0.88	3.67	1.03
S0.25	0.25	6.94	2.96	6.22	2.14	5.98	2.36	6.38	2.49
S0.5	0.5	7.63	3.14	7.14	3.3	8.28	2.69	7.68	3.04
S0.75	0.75	8.15	3.39	7.39	2.99	7.88	3.49	7.81	3.29
S1	1	8.63	3.56	7.37	2.82	8.53	3.8	8.18	3.93



شکل ٦ نمودار بار کششی–تغییر مکان نمونه‌ها

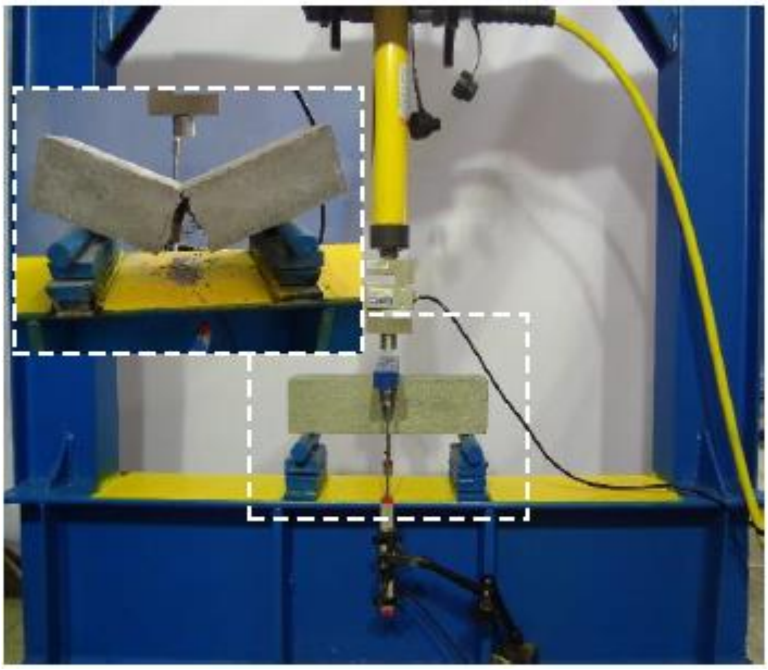
نمودار بار-تغییر مکان برای نمونه‌های کششی در شکل (٦) نشان داده شده است. مطالعات قبلی نیز افزایش مقاومت کششی بتن‌های خودتراکم را در اثر افزودن الیاف فولادی گزارش کرده‌اند [22-19].

آزمایش مقاومت خمشی

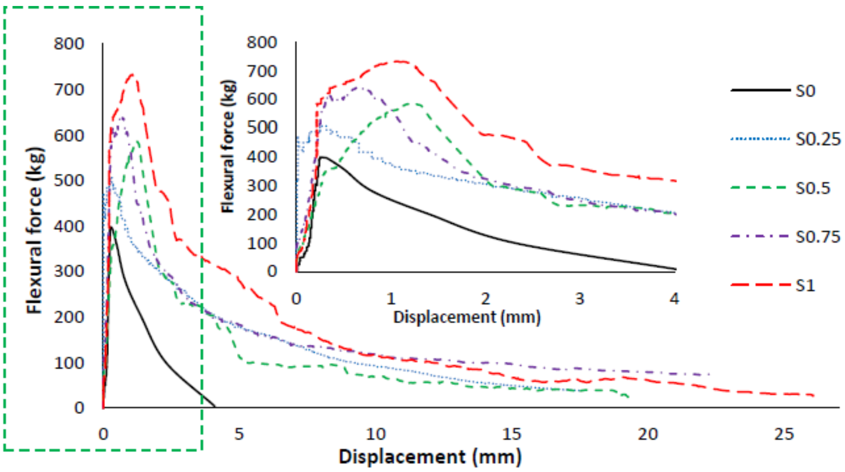
برای تعین مقاومت خمشی ۱۵ عدد تیر کوچک خمشی با ابعاد ٦×۸×۳۲ سانتی‌متر ساخته و تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای (اعمال یک‌بار متمرکز در وسط دهانه) بر اساس استاندارد ASTM C78 [23] مطابق شکل (۷) قرار گرفتند. در این آزمایش حداکثر بار خمشی تحمل شده توسط نمونه‌ها برداشت و از طریق رابطهٔ (۳) مقاومت خمشی تیرها بر حسب مگاپاسکال محاسبه شد:

$$\text{مقاومت کششی} = \frac{3PL}{2b.d^2} \qquad (۳)$$

در این رابطه P حداکثر نیروی خمشی تحمل شده توسط تیر و L، b و d نیز به ترتیب طول، عرض و ارتفاع تیر می‌باشند. با نصب LVDT در وسط دهانهٔ تیرها خیز آن‌ها در حین بارگذاری تا لحظهٔ شکست برداشت و نمودار بار-تغییر مکان خمشی تیرها رسم شد. در این آزمایش مشاهده شد که الیاف فولادی می‌تواند بعد از ایجاد ترک اولیه در تیرها با ایجاد پیوستگی در دو طرف ترک ایجادشده و جلوگیری از گسترش آن، رفتار ترد تیرهای بتنی غیرمسلح را بهبود بخشد و مقاومت خمشی و شکل‌پذیری آن‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. هرچقدر میزان الیاف فولادی در تیر افزایش می‌یابد، میزان مقاومت و شکل‌پذیری نیز نسبت به نمونه شاهد به میزان بیشتری افزایش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که در بهترین حالت افزودن ۱ درصد الیاف فولادی در نمونه S1 نسبت به نمونه بدون الیاف S0 موجب افزایش ۸۷ درصدی مقاومت خمشی شد. میزان افزایش شکل‌پذیری تیرها نیز از نمودار بارخمشی-تغییر مکان نشان داده شده در شکل (۸) قابل‌مشاهده است. در بهترین حالت تغییر مکان نهایی تیر دارای ۱ درصد الیاف فولادی نسبت نمونه شاهد افزایش تقریباً ٦ برابری داشته است.



شکل ۷ انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای بر روی تیرها



شکل ۸ نمودار بار خمشی–تغییر مکان نمونه‌ها

جدول ۷ نتایج آزمایش مقاومت خمشی

Specimen	Volume of fiber (%)	SP1		SP2		SP3		Ave	
		F.S (Flexural strength) (MPa)	F.D (Flexural displacement) (mm)	F.S (MPa)	F.D (mm)	F.S (MPa)	F.D (mm)	F.S (MPa)	F.D (mm)
S0	0	4.98	4.1	4.14	4.22	5.24	4.71	4.79	4.34
S0.25	0.25	6.18	14.98	6.34	17.54	5.98	16.24	6.17	16.25
S0.5	0.5	7.29	17.39	6.88	19.75	7.32	19.28	7.16	18.81
S0.75	0.75	7.70	24.34	8.36	22.31	8.14	25.12	8.07	23.92
S1	1	9.16	26.09	9.01	25.08	8.67	27.62	8.95	26.26

آزمایش اولتراسونیک (UPV)

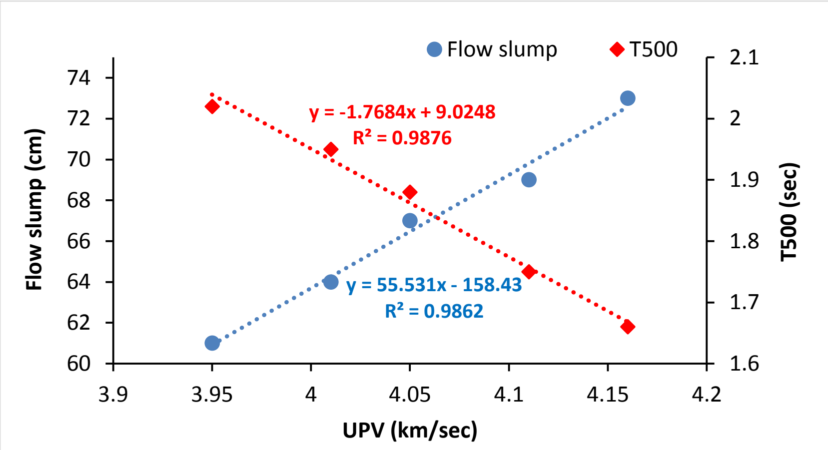
آزمایش اولتراسونیک یکی از آزمایش‌های غیر مخرب بتن است که نتایج آن می‌تواند نشان‌دهندهٔ کیفیت بتن باشد [24]. محققان مختلفی روابط بین خصوصیات مکانیکی بتن (مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ...) و سرعت پالس اولتراسونیک را موردبررسی قرار داده‌اند [25,26]. آزمایش اولتراسونیک بر روی نمونه‌های مکعبی با ضلع ۱۰ سانتی‌متر بر روی ۵ طرح اختلاط نشان داده شده در جدول (۲) انجام شد تا اثر الیاف‌های فولادی بر روی تراکم و کیفیت بتن مشاهده شود. این آزمایش از روش ارسال مستقیم مطابق شکل (۹) انجام شد و سرعت موج پالس با استفاده از رابطهٔ (٤) محاسبه شد:

$$\text{سرعت موج پالس} = \frac{L}{T} \qquad (٤)$$

در این رابطه V سرعت پالس برحسب کیلومتر بر ثانیه (km / s)، L فاصله بین دو مبدل برحسب میلی‌متر (mm) و برابر با ۱۰۰ میلی‌متر و T زمان انتقال امواج برحسب میکروثانیه (µsec) است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد با افزایش درصد حجم الیاف سرعت موج پالس کاهش می‌یابد، این بدان معناست که افزودن الیاف به بتن موجب افزایش حفرات و کاهش تراکم بتن می‌شود. در نمودار شکل (۱۰) با ارائه یک تحلیل رگرسیون بین نتایج سرعت موج التراسونیک و نتایج آزمایش مربوط به بتن خودتراکم تازه (G-ring) نشان داده شده که افزایش میزان الیاف در بتن به همان نسبت که موجب کاهش روانی در بتن خودتراکم تازه می‌شود موجب کاهش سرعت پالس در بتن سخت شده نیز می‌شود و میان نتایج این پارامترها رابطهٔ خطی وجود دارد.



شکل ۹ انجام آزمایش اولتراسونیک (UPV)



شکل ۱۰ ارتباط بین سرعت پالس با خواص خودتراکمی بتن در آزمایش G-ring

آزمایش مقاومت ضربه‌ای

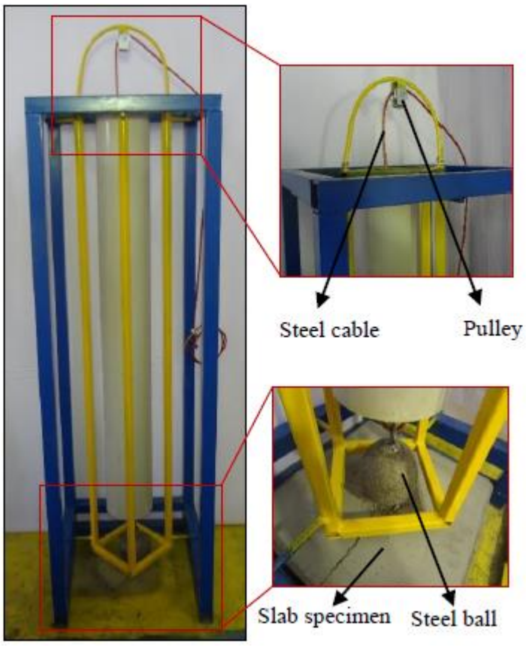
تعداد ۲۷ عدد دال با ابعاد ۴۰×۴۰ در ضخامت‌های مختلف ۲/۵، ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر ساخته و تحت اثر ضربه ناشی از برخورد وزنه افتان آزمایش شدند. در هر ضخامت ۹ عدد دال شامل ۳ عدد دال بدون الیاف، ۳ عدد حاوی ۰/۵ در صد الیاف فولادی و ۳ عدد حاوی ۱ درصد الیاف فولادی ساخته شد. با انجام این آزمایش اثر دو پارامتر ضخامت و الیاف فولادی بر روی مقاومت ضربه‌ای دال‌ها بررسی و باهم مقایسه شد. برای انجام این آزمایش دستگاهی مطابق شکل (۱۱) طراحی و ساخته شد، دستگاه ضربه ساخته‌شده شامل یک گوی فولادی به وزن ۵/۸ کیلوگرم است که با استفاده از کابل فولادی و قرقره نصب‌شده بر روی دستگاه تا ارتفاع ۱/۵ متر بالا رفته و به‌صورت مکرر بر روی نمونه تا ایجاد گسیختگی در آن‌ها رها می‌شود. در دستگاه ساخته شده برای حرکت گوی دریک مسیر مستقیم از یک سازه هدایت‌کننده گوی، شامل یک مکعب فولادی و لوله پلاستیکی استفاده شده است. در این آزمایش سه پارامتر تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک قابل روئیت، تعداد ضربه بر ایجاد انهدام در دال و همچنین انرژی جذب‌شده دال تا لحظه انهدام ثبت شده است. انرژی جذب‌شده توسط دال‌ها تا لحظه انهدام از رابطهٔ (۵)

برحسب کیلوژول محاسبه‌شده است که در این رابطه N تعداد ضـربات برای ایجاد انهدام، W وزن گوی فولادی مورداســتفاده برحســب کیلو نیوتن (kN) و H ارتفاع سقوط گوی برحسب متر (m) است:

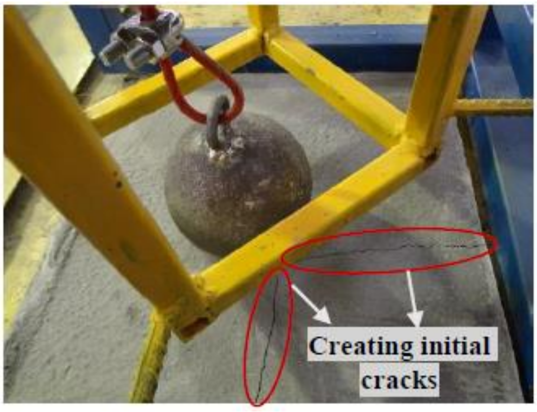
$$\text{انرژی جذب شده} = N \times W \times H \qquad (۵)$$

در این تحقیق معیار انهدام در دال ها، ایجاد حفره بر اثر ضربه ناشی از برخورد گوی یا گسترش ترک‌های ایجادشده در تمام سطح دال (چندتکه شدن دال) در نظر گرفته شده است.

مقاومت اولین ترک. تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک برای ۲۷ عدد دال ثبت و در جدول (۸) آمده است. لحظه ایجاد ترک‌های اولیه در دال‌ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با بررسی نتایج حاصل از این آزمایش به نقش بسیار بالای الیاف فولادی در افزایش مقاومت اولین ترک نمونه‌ها پی می‌بریم. با بررسی وضعیت دال‌های دارای الیاف فولادی در ضخامت‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های شاهد متوجه می‌شویم که اثر الیاف فولادی در دال‌های با ضخامت بیشتر، قابل‌توجه‌تر بوده است به‌طوری‌که افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی در دال‌های با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر توانست مقاومت اولین ترک را به میزان ۱۸/۳۷ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد، درصورتی‌که همین مقدار الیاف در دال‌های با ضخامت ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر توانست به ترتیب باعث افزایش ۲۶/۰۹ و ۳۳/۳۹ برابری مقاومت اولین ترک نسبت به نمونه شاهد شود. همچنین افزودن ۱ درصد الیاف فولادی در این دال‌ها به ترتیب افزایش ۳۶/۹۳، ۳۷/۸۳ و ۴۷/۷۲ برابری را در پارامتر مقاومت اولین ترک ایجاد نموده است. از طرفی افزایش ضخامت دال‌ها برخلاف الیاف فولادی نتوانست افزایش مقاومت اولین ترک را به اندازه قابل‌توجهی افزایش دهد. به‌طوری‌که میانگین تعداد ضربات برای ایجاد اولین ترک در نمونه‌های بدون الیاف با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر، ۱/۶۷ ضربه بود که با افزایش ۲ و ۳ برابری ضخامت دال این پارامتر به اعداد ۲/۶۷ و ۶ افزایش یافت که این افزایش در مقایسه با تأثیر الیاف فولادی ناچیز و قابل‌چشم‌پوشی است.

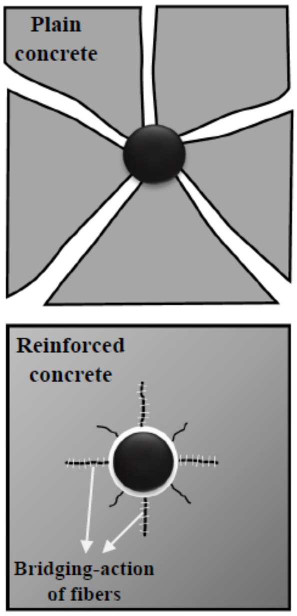


شکل ۱۱ دستگاه آزمایش ضربه وزنه افتان



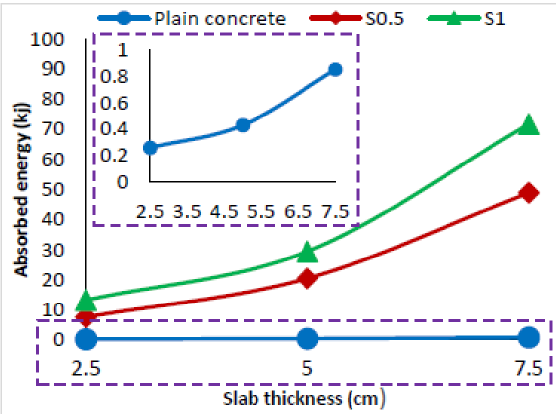
شکل ۱۲ ایجاد ترک اولیه در نمونه‌های دال

مقاومت نهایی. در آزمایش ضربه وزنه افتان تعداد ضربه برای ایجاد انهدام نمونه‌ها نیز برداشت و در جدول (۸) نشان داده شده است. نکته قابل‌توجه در رفتار نمونه‌های بدون الیاف، ترد شکنی آن ها بود. در این نمو نه ها مشاهده شد بعد از ایجاد اولین ترک خیلی سریع بعد از چند ضربه ترک‌ها در تمام سطح دال بتنی گسترش‌یافته و دال به چندتکه تقسیم شد. افزایش ضخامت دال بتنی از ۲/۵ سانتی‌متر به ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر نیز نتوانست این ترد شکنی را به میزان قابل‌توجهی بهبود بخشد و در این دال‌ها نیز بعد از ایجاد اولین با ترک با چند ضربه نمونه به گسیختگی کامل ر سید. افزایش ضخامت دال بتنی از ۲/۵ سانتی‌متر به ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر توانست مقاومت نهایی را به ترتیب ۱/۶۷ و ۳/۳۳ برابر افزایش د هد. افزودن الیاف‌های فولادی برخلاف افزایش ضخامت با ایجاد چقرمگی بالا در نمونه‌ها تعداد ضربه برای ایجاد انهدام در نمو نه ها را به میزان قابل‌توجهی افزایش داد. تأثیر الیاف‌های فولادی در افزایش مقاومت نهایی همانند مقاومت اولین ترک در دال‌های ضخیم‌تر بیشتر بود، به‌طوری‌که افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی در دال‌های با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر توانست افزایش مقاومت نهایی ۲۹/۵۶ برابری را نسبت به نمونه شاهد (T2.5-S0) ایجاد کند در صورتی‌که همین مقدار الیاف در دال‌های با ضخامت ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر افزایش مقاومت نهایی ۴۷/۷۳ و ۵۷/۲ برابری را ایجاد کرد. افزودن ۱ درصد الیاف فولادی نیز توانست در دال‌های با ضخامت ۲/۵، ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر به ترتیب افزایش مقاومت ۵۱/۲۲، ۶۸/۷۳ و ۸۳/۹ برابری را نسبت به نمونه شاهد ایجاد کند. نکته قابل‌توجه تفاوت در نحوه گسیختگی دال‌ها بود، نحوه‌ی گسیختی دال‌های بدون الیاف به‌صورت گسترش ترک‌های اولیه در تمام سطح دال و چندتکه شدن آن است، درصورتی‌که دال‌های دارای الیاف فولادی با چقرمگی بسیار بالاتری رفتار کرده و گسیختگی آن‌ها اغلب به‌صورت ایجاد حفره بر اثر تعداد دفعات بالای ضربه رخ داد. تفاوت در نحوه گسیختگی دال‌ها به‌صورت شماتیک در شکل (۱۳) آمده است.

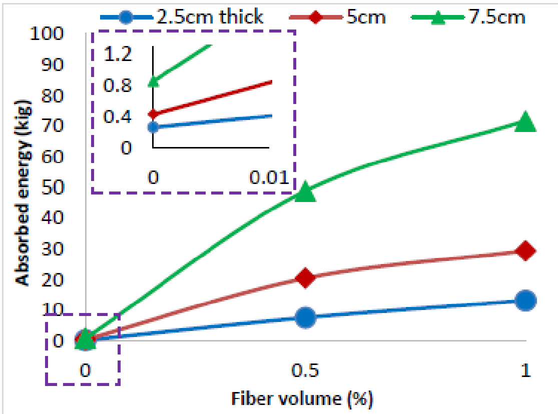


شکل ۱۳ طرح شماتیک نحوه گسیختگی در دال‌های بتنی غیرمسلح و مسلح به الیاف فولادی در آزمایش ضربه وزنه افتان

انرژی جذب شده. با استفاده از رابطهٔ (٥) انرژی جذب شـده نمونه‌ها تا لحظه ایجاد گسیختگی بر حسب کیلوژول محا سبه شده و در جدول (٨) نشان داده شده اسـت. در نمودار شـکل (١٤) اثر الیاف فولادی بر روی جذب انرژی دال‌های با ضـخامت مختلف نشـان داده شده ا ست که این نمودار نشان دهنده تأثیر بسیار بالای الیاف فولادی بر روی جذب انرژی نمو نه ها دارد. با توجه به نمودار حاصل‌شده مشخص می‌شود تأثیر الیاف فولادی بر روی جـذب انرژی نمونـه‌هـا در دال‌هـای ضخیم‌تر بی شتر ا ست. در نمودار شکل (١٥) نیز تأثیر افزایش ضـ خا مت بر جذب انرژی دال های دارای در صدهای مختلف الیاف ن شان داده شده ا ست. تأثیر افزایش ضـخامت در دال‌های بدون الیاف بسـیار ناچیز ا ست که نشان می‌دهد ضخامت دال‌ها بر خلاف پارامتر درصـد الیاف، پارامتر مناسـبی برای افزایش مقاومت ضربه‌ای و جذب انرژی دال‌ها نیست. البته همان‌طور که در نمودار شکل (١٥) مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت در دال‌های دارای الیاف فولادی باعث افزایش قابل‌توجه جذب انرژی می‌شود که به نظر می‌رسد علت آن افزایش مقدار الیاف موجود در دال با شد، زیرا در دال‌های بدون الیاف مشاهده شد افزایش ضخامت نمی‌تواند اثر چندانی بر افزایش جذب انرژی دال‌ها داشـته باشـد. تفاوت در نحوه گسیختگی دال‌ها در شکل (١٦) مشاهده می‌شود.



شکل ١٥ اثر افزایش ضخامت در افزایش جذب انرژی دال‌ها



شکل ١٤ اثر درصد الیاف فولادی در افزایش جذب انرژی دال‌ها



شکل ١٦ تفاوت در نحوه‌ی گسیختگی دال‌ها

جدول ۸ نتایج آزمایش ضربه وزنه افتان

Specimen	Resistance of the first crack	Average	Ultimate Resistance	Average	Absorbed energy (kj)	Average (kj)
	1		2		0.17	
T2.5-S0	2	1.67	4	3	0.34	0.26
	2		3		0.26	
	32		86		7.34	
T2.5-S0.5	36	30.67	107	88.67	9.13	7.57
	24		73		6.23	
	66		162		13.83	
T2.5-S1	48	61.67	121	153.67	10.33	13.12
	71		178		15.2	
	3		5		0.43	
T5-S0	2	2.67	4	5	0.34	0.43
	3		6		0.51	
	92		287		24.49	
T5-S0.5	65	69.66	232	238.67	19.8	20.37
	52		197		16.81	
	81		302		25.77	
T5-S1	114	101	401	343.67	34.22	29.33
	108		328		27.99	
	5		10		0.85	
T7.5-S0	7	6	11	10	0.94	0.85
	6		9		0.77	
	182		574		48.99	
T7.5-S0.5	221	200.33	630	572	53.77	48.82
	198		512		43.70	
	293		902		76.98	
T7.5-S1	267	286.33	801	839	68.36	71.61
	299		814		69.47	

نتایج

در این تحقیق خصوصیات مکانیکی و ضربه‌ای بتن‌های کامپوزیتی توانمند برر سی شده ا ست. هدف ا صلی از انجام این تحقیق بررسی و مقایسه اثر دو پارامتر افزایش ضـــخامت و افزودن الیاف فولادی بر روی مقاومت ضربه‌ای دال‌های بتنی تحت اثر ضربه وزنه افتان است.

نتایج آزمایش ضربه وزنه افتان نشان‌دهندهٔ تأثیر بسیار بالای الیاف فولادی بر روی مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی دال‌ها است. با مقایسه نتایج آزمایش بر روی دال‌های باضخامت مختلف متوجه می‌شویم الیاف فولادی بر روی افزایش مقاومت دال‌های ضخیم‌تر تأثیر بیشتری را داشته است. از طرفی نتایج نشان‌دهنده تأثیر

بسیار کم پارامتر ضخامت بر روی افزایش مقاومت ضربه-ای دال‌ها بوده است که در مقایسه با تأثیر الیاف فولادی ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است، بنابراین افزودن الیاف فولادی پارامتر مناسب‌تری برای افزایش مقاومت ضربه-ای دال‌ها است.

با انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های با درصدهای مختلف الیاف فولادی مشاهده شد الیاف فولادی نمی‌تواند تأثیری بر روی افزایش مقاومت فشاری داشته باشد، درصورتی‌که این الیاف توانست در افزایش مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها به‌طور قابل‌توجهی مؤثر واقع شود. آزمایش‌های مربوط به بتن خودتراکم تازه و اولتراسونیک نیز تأثیر منفی الیاف فولادی بر روی کارایی و تراکم بتن را نشان دادند.

با مقایسه تأثیر الیاف فولادی بر روی مقاومت ضربه‌ای و خصوصیات مکانیکی (فشاری، کششی و خمشی) بتن مشاهده می‌شود که تأثیر این الیاف در بهبود رفتار ضربه‌ای بتن نسبت به تأثیر آن در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن بسیار قابل‌توجه‌تر است، به‌طوری‌که در بهترین حالت افزودن ۱ درصد الیاف فولادی توانست مقاومت فشاری، کششی و خمشی را به ترتیب ۱۰، ۱۲۳ و ۸۷ درصد افزایش دهد درصورتی‌که همین مقدار الیاف فولادی در بهترین حالت موجب افزایش ۸۳ برابری مقاومت ضربه‌ای دال بتنی شد.

مراجع

1. Nehdi, M., and Ladanchuk, J.D., “Fiber synergy in fiber-reinforced self-consolidating concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 6, pp. 508-517, (2004).
2. Wild, S., Sabir, BB., and Khatib, JM., “Factors influencing strength development of concrete containing silica fume”, *Cement Concrete Res*, Vol. 25, No. 7, pp. 1567–1580, (1995).
3. Mastali, M., and Dalvand, A., “Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete”, *construction and building materials*, Vol. 125, pp. 196-209, (2016).
4. Khayat, K.H., and Roussel, Y., “Testing and performance of fiber reinforced, self-consolidating Concrete”, Skarendahl, A., and Petersson, O., editors, Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete, Stockholm, Sweden, pp. 36-48, (1999).
5. Bader, and Ashour., “Modified ACI Drop-weight impact test for concrete”, *ACI materials Journal*, Vol. 102, No. 4, pp. 249-255, (2005).
6. Ozawa, K., Maekawa, K., and Okamura, H., “Self-Compacting high performance concrete”, Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering), Vol. 34, pp. 135-149, (1996).
7. Okamura, H., “Self Compacting High-Performance Concrete”, *Concrete International*, pp 50-54, (1997).
8. Persson, B., “A Comparison between mechanical properties of self-copmacting concrete and the corresponding properties of normal concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 193-198, (2001).
9. Mastali, M., Dalvand, A., and Sattarifard, A., “The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycle CFRP fiber with different and dosages”,

Composite part B, Vol. 112, pp. 74-92, (2017).

10. Song, P.S., Hwang, S., and Sheu, B.C, "Strength properties of nylon-and_ polypropylene-fiber reinforced concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 1546-1550, (2005).
11. Deng, Z., and Li, J., "Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete", *Cement Concrete Res*, Vol. 25, No. 15, pp. 189–204, (2005).
12. Sudarsana Rao, H., Vaishali. Ghorpade, G. N.V., and Gnaneswar, K., "Response of SIFCON two-way slabs under impact loading", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 452–458, (2010).
13. Bindiganavile, V., and Banthia, N., "Polymer and steel fiber-reinforced cementitios composites under impact loading, Part 2: Flexural toughness", *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 1, pp. 17-24, (2001).
14. Parviz, S., Ataullah, Kh., and Hsu, J.W., "Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, N0. 6, pp. 535-540, (1992).
15. ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2012.
16. Nagataki, S., Fujiwara, H., "Self-compacting property of highly-flowable concrete, in: V.M. Malhotra (Ed.)", *American Concrete Institute*, Vol. 154, pp. 301‑314, (1995).
17. ASTM C 39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003.
18. ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1994.
19. El-Dieb, A., "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultrahigh- strength self-compacting concrete incorporating steel fibers", *J. Mater. Des*, Vol. 30, pp. 4286‑4292, (2009).
20. Aslani, F., Nejadi, S., "Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress‑strain curve, and energy dissipated under compression", *J. Compos. B*: Eng, Vol. 53, pp. 121‑133, (2013).
21. Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., and Bier, T.A., "Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC)", *J. Constr. Build. Mater*. Vol. 98, pp. 325‑333, (2015).
22. Altun, F. and Aktas, B., "Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete", *J. Constr. Build. Mater*, Vol. 38, pp. 575‑581, (2013).
23. ASTM C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.
24. Chao-Lung, H., Anh-Tuan, B.L., and Chun-Tsun, C., "Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete", *J. Constr. Build. Mater*, Vol. 25, pp. 3768‑3772, (2011).

25. Demirboga, R., Turkmen, I., and Karako, M.B., “Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete”, *J. Cem. Concr. Res*. Vol. 34, pp. 2329-2336, (2004).
26. Prassianakis, I.N., and Giokas, P., “Mechanical properties of old concrete using destructive and ultrasonic non-destructive testing methods”, *Mag. Concr. Res*, Vol. 55, pp. 171-176, (2003).